

RELACIÓN ENTRE LAS PARTÍCULAS FINAS (PM_{2.5}) Y RESPIRABLES (PM₁₀) EN LA CIUDAD DE MEDELLÍN

Carlos Alberto Echeverri Londoño¹

Gabriel Jaime Maya Vasco²

Recibido: 11/02/2008

Aceptado: 04/04/2008

RESUMEN

En este trabajo se presenta parte de los resultados del proyecto “Patologías respiratorias en niños preescolares y su relación con la contaminación atmosférica de Medellín”, realizado por la Universidad de Medellín y la Universidad CES para la Secretaría de Salud de Medellín dentro del contrato 4700026668 de 2006.

Se realizaron mediciones simultáneas de partículas finas (PM_{2.5}) y respirables (PM₁₀) durante el período de febrero a octubre de 2007 en varios sitios de la ciudad de Medellín, capital del departamento de Antioquia, habitada aproximadamente por 2'250.000 personas. Los resultados del análisis muestran, en la mayoría de los casos, una correlación positiva y lineal entre los dos parámetros.

La relación (PM_{2.5}/PM₁₀) promedio para los sitios o zonas bajo consideración en este estudio fue de aproximadamente 0.67, valor bastante considerable que hace pensar que probablemente se puede cumplir con la norma anual para PM₁₀, pero no para PM_{2.5}.

Los resultados obtenidos identifican las partículas finas como uno de los principales problemas de contaminación en la ciudad de Medellín.

Palabras clave: contaminación atmosférica, partículas finas (PM_{2.5}), partículas respirables (PM₁₀) y relación (PM_{2.5}/PM₁₀)

¹ Ingeniero Químico, Magíster en Ingeniería Ambiental. Docente-Investigador Grupo de Investigaciones y Mediciones Ambientales GEMA. Facultad de Ingeniería, Programa de Ingeniería Ambiental. Universidad de Medellín. e-mail: cecheverri@udem.edu.co

² Ingeniero Sanitario. Docente-Investigador Grupo de Investigaciones y Mediciones Ambientales GEMA. Facultad de Ingeniería, Programa de Ingeniería Ambiental. Universidad de Medellín. e-mail: gjmaya@udem.edu.co

RELATION BETWEEN FINE PARTICLES (PM_{2.5}) AND BREATHABLE PARTICLES (PM₁₀) IN MEDELLIN CITY

ABSTRACT

This article shows part of the results from the project called: “Respiratory pathologies in pre-school children and their relation to atmospheric contamination in Medellin,” carried out by Universidad de Medellin and Universidad CES for Medellin Health Secretariat according to contract No. 4700026668, year 2006.

Simultaneous measurements of fine particles (PM_{2.5}) and breathable particles (PM₁₀) were made from February to October, 2007 in several sites of Medellin, the capital city of Antioquia State, where about 2,250,000 inhabitants live. In almost all cases, analysis results show a positive and linear correlation between both parameters.

Average ratio (PM_{2.5}/PM₁₀) for sites and zones tested in this study was 0.67 approximately, which is a very meaningful value, what makes us think that annual norm for PM₁₀ can probably be accomplished, but not the one for PM_{2.5}.

Results obtained identify fine particles as one of the main contamination problems in Medellin city.

Keywords: air pollution, fine particles (PM_{2.5}), breathable particles (PM₁₀), and ratio (PM_{2.5}/PM₁₀)

INTRODUCCIÓN

La contaminación atmosférica es la presencia en la atmósfera de sustancias no deseables, en concentraciones, tiempo y circunstancias tales que pueden afectar significativamente el confort, la salud y el bienestar de las personas o el uso y disfrute de sus propiedades.

La presencia de partículas en la atmósfera, solas o combinadas con otros contaminantes, genera riesgos para la salud, afectando el sistema respiratorio humano (Nieto, 1993); aun en concentraciones bajas de partículas respirables ($20 \mu\text{g}/\text{m}^3$), se pueden incrementar los riesgos de infecciones respiratorias agudas (IRA) y episodios asmáticos (Abbey et al, 1995).

La “partícula” es un término que se emplea para describir cualquier material sólido o líquido dividido finamente, que es dispersado y arrastrado por el aire y que tiene un tamaño que varía entre 0.0002 y $500 \mu\text{m}$. Los términos “aerosol” y “partículas” se utilizan a veces indistintamente, pues los aerosoles se definen como dispersiones de sólidos o líquidos en un medio gaseoso.

Las partículas provienen de procesos de combustión, actividades industriales o fuentes naturales. También se originan como resultado de la oxidación de contaminantes gaseosos en la atmósfera y su reacción con vapor de agua.

Tanto las fuentes naturales como las antropogénicas emiten partículas a la atmósfera. Las emisiones de partículas incluyen polvos, aspersión marina, emisiones volcánicas, emanaciones de la flora, e incendios de bosques. Las emisiones antropogénicas provienen de fuentes estacionarias, fuentes fugitivas (polvos de las carreteras e industrias), y fuentes móviles.

Las partículas se clasifican a veces como viables (capaces de vivir) y no viables. Algunos ejemplos de partículas viables son: bacterias, hongos, mohos y esporas. Las partículas no viables incluyen sustancias tales como compuestos orgánicos, metales, compuestos inorgánicos y sal marina.

Recientemente se ha discutido en diferentes espacios sobre la necesidad de monitorear partículas PM_{2.5}, además de las partículas PM₁₀ en la ciudad de Medellín, dado que existe evidencia de estudios nacionales e internacionales según los cuales, las partículas más finas tienen una mayor asociación con los indicadores de mortalidad y morbilidad de la población.

Según la Organización Mundial de la Salud, la exposición a las partículas supone graves riesgos para la salud en muchas ciudades de los países desarrollados y en desarrollo. Es posible establecer una relación cuantitativa entre el nivel de contaminación y parámetros como la mortalidad o la morbilidad (OMS, 2006).

La contaminación del aire por partículas necesita serias atenciones por diversos motivos:

- Muchas partículas penetran en el sistema respiratorio con mayor efectividad que los contaminantes gaseosos,
- Algunas partículas se comportan sinérgicamente y aumentan los efectos tóxicos de otros contaminantes,
- La contaminación por partículas reduce la visibilidad de la atmósfera, y
- En la atmósfera se forman partículas a partir de algunos contaminantes gaseosos.

La evidencia epidemiológica indica que un aumento en $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en las partículas PM₁₀ está asociado a un aumento alrededor del 1% en la mortalidad por todas las causas (OMS, 2006). A pesar de diversos cuestionamientos sobre las evidencias epidemiológicas (Rojas y Galvis, 2005), esta asociación continúa siendo aceptada por la mayor parte de las entidades de protección ambiental alrededor del mundo.

En los últimos años, se ha encontrado evidencia sobre asociaciones más fuertes entre las partículas PM_{2.5} y los datos de morbilidad y mortalidad, que llevaron a ciertos estados de Estados Unidos a establecer una norma de calidad del aire para PM_{2.5},

con el fin de reducir los riesgos de salud asociados a este contaminante (Rojas y Galvis, 2005).

Las partículas respirables se han clasificado de acuerdo con dos tamaños: PM10 y PM2.5. Las primeras son aquellas partículas gruesas en su mayoría con pH básico producto de la combustión no controlada; algunas están relacionadas con la desintegración mecánica de la materia o la resuspensión de partículas en el ambiente. El segundo

tamaño agrupa a las partículas generalmente ácidas, que contienen hollín y otros derivados de las emisiones vehiculares e industriales, y corresponde a la fracción más pequeña y agresiva debido a que éstas son respirables en un 100% y por ello se alojan en bronquios, bronquiolos y alvéolos (Larsen, 2003). La tabla 1 presenta las fuentes relacionadas con la emisión de partículas finas (PM2.5) y partículas respirables (PM10).

Tabla 1. Fuentes de emisión y relación PM2.5/PM10 [12].

FUENTES DE EMISIÓN	RELACIÓN PM2.5/PM10
Fuentes estacionarias	
Combustión de combustibles	0.96
Procesos industriales	0.56
Fuentes fugitivas	
Calles pavimentadas	0.25
Calles no pavimentadas	0.15
Construcción y demolición	0.15
Operaciones agrícolas (cultivos, etc.)	0.20
Procesos varios	
Quema de desechos	0.96
Quema de residuos agrícolas	0.93–0.96
Incendios forestales	0.93
Fuentes móviles	
En carretera	0.98

Fuente: Rojas y Galvis, 2005

Existen relaciones entre el tamaño de las partículas y sus fuentes. Las partículas con diámetros superiores a 10 μm provienen de procesos mecánicos como la erosión, trituración, molienda y la dispersión producida por el viento, así como la pulverización de materia sólida debido a la acción de vehículos. Las partículas entre 1 y 10 μm de diámetro incluyen por lo común productos de combustión. Las partículas con diámetro comprendido entre 0.1 y 1 μm son principalmente productos de combustión y aerosoles fotoquímicos. Las

partículas menores de 0.1 μm de diámetro no han sido bien identificadas desde el punto de vista químico. Parecen originarse casi por completo a partir de fuentes de combustión.

En la atmósfera, las partículas menores de 0.1 μm muestran un comportamiento similar al de las moléculas. Su movimiento es aleatorio con frecuentes colisiones con las moléculas gaseosas. Además, chocan a menudo entre sí, se agrupan y forman agregados mayores en un proceso denominado coagulación. Las partículas mayores de 1 μm

se comportan de una manera muy distinta debido a que sufren una significativa deposición gravitacional. La tasa de coagulación de estas partículas es baja. Las partículas mayores de 10 μm permanecen en suspensión en el aire durante períodos de tiempo relativamente cortos, como consecuencia de elevadas tasas de sedimentación gravitacional. Como resultado de los procesos de coagulación y sedimentación, las partículas que permanecen suspendidas en la atmósfera durante prolongados períodos, se encuentran predominantemente en la gama de tamaños comprendida entre 0.1 y 10 μm . El tamaño de las partículas es un factor muy importante en la determinación de los efectos sobre la salud.

En general aquellas de diámetro aerodinámico mayor de 2 a 5 micrómetros no penetran muy profundamente en los pulmones pues son interceptadas por los pelos nasales o se quedan en las membranas mucosas de los pasajes orales o en la tráquea, y son después tragadas o expectoradas. Las partículas muy pequeñas (menores que 0.1 μm) tienden a depositarse en el árbol traqueo-bronquial por difusión, y entonces son removidas de la misma manera que las partículas grandes. Pero las partículas en el intervalo de tamaño de 0.1 a 3 μm pueden

penetrar muy profundo en los pulmones y después son depositadas en los bronquiolos respiratorios o en los sacos alveolares. Muchos estudios epidemiológicos indican una alta correlación entre las partículas y enfermedades respiratorias como bronquitis, asma, enfisema, pulmonía y enfermedades cardíacas (Navarro, 1981).

Partículas menores de 10 micrómetros de diámetro (PM10) pueden entrar y quedar atrapadas en las vías respiratorias. Las partículas de diámetro mayor son generalmente producidas por procesos mecánicos de abrasión o fractura de sólidos, y en condiciones de poco viento se precipitan rápidamente al suelo.

La relación PM2.5/PM10 ha sido determinada en numerosos estudios llevados a cabo en diferentes ciudades. Como es predecible, existe diversidad en los valores encontrados, debido a las diferencias geológicas, climatológicas, atmosféricas, y en las fuentes de emisión de contaminantes, que influyen en la distribución de tamaños de las partículas en cada sitio de monitoreo (Rojas y Galvis, 2005). La tabla 2 presenta algunos de los valores encontrados por varios autores para la relación PM2.5/PM10 en diferentes ciudades del mundo (Rojas y Galvis, 2005; y Larsen, 2004).

Tabla 2. Relación PM2.5/PM10 para diferentes ciudades del mundo.

CIUDAD	RELACIÓN PM2.5/ PM10
Ciudad de México, México	0.50 - 0.70
Santiago, Chile	0.40 - 0.70
Birmingham, Reino Unido	0.50 - 0.80
Sydney, Australia	0.29 - 0.53
Hong Kong, China	0.53 - 0.78
Bogotá, Colombia [†]	0.19 - 0.73
Bogotá, Colombia ^{††}	0.60
Bucaramanga, Colombia ^{††}	0.61
Área Metropolitana del Valle de Aburrá, Colombia ^{††}	0.60
Cali, Colombia ^{††}	0.59

Notas: [†] Valores obtenidos y reportados por Rojas (Rojas y Galvis, 2005).

^{††} Valores estimados por Larsen para varias regiones de Colombia (Larsen, 2004).

Fuente: Rojas y Galvis (2005) y Larsen (2004).

La relación entre los parámetros PM_{2.5} y PM₁₀ puede emplearse para evaluar la posibilidad de predecir las concentraciones de PM_{2.5} a partir de los datos existentes de PM₁₀ (Rojas y Galvis, 2005; y Redaire, 2005).

I. METODOLOGÍA

I.1. Sitios de muestreo

La selección de los sitios de monitoreo y ubicación de los equipos requeridos se hizo teniendo en cuenta criterios como: densidad demográfica, usos del suelo, dirección del viento, tipos y características de las fuentes más importantes del sector, y los objetivos del estudio. Las mediciones de partículas respirables y finas se realizaron en 8 sitios de la ciudad de Medellín, la cual se dividió en cuatro zonas, así:

- Contaminación baja: zonas con concentraciones de partículas PM₁₀ igual al 50%

o menos de la norma anual de calidad del aire.

- Contaminación media baja: zonas con concentraciones de partículas PM₁₀ entre el 51% y el 75% de la norma anual de calidad del aire.
- Contaminación media alta: zonas con concentraciones de partículas PM₁₀ entre el 76% y el 100% de la norma anual de calidad del aire.
- Contaminación alta: zonas con concentraciones de partículas PM₁₀ superiores a la norma anual de calidad del aire.

Las zonas fueron seleccionadas según los datos de calidad del aire reportados por REDAIRE (Redaire, 2005) y algunos estudios realizados en la ciudad de Medellín (Secretaría del Medio Ambiente, 2006). La tabla 3 presenta la ubicación de los sitios de muestreo para la zona a la que inicialmente fueron asignados.

Tabla 3. Ubicación de los sitios de muestreo.

ZONA	PUNTO	UBICACIÓN
Contaminación alta	1	Centro de Medellín
	2	Guayabal
Contaminación media alta	3	Andalucía
	4	Castilla
Contaminación media baja	5	El Estadio
	6	Robledo
Contaminación baja	7	Santa Elena
	8	Belén Los Alpes

Fuente: Elaboración propia. Datos arrojados por el proyecto de investigación

I.2. Período de medición y toma de muestras

Los muestreos se realizaron entre el 8 de febrero y el 18 de octubre de 2007 para los sitios de muestreo seleccionados. Cada punto de medición se monitoreó durante tres periodos espaciados para así cubrir diferentes condiciones climáticas.

Cada periodo tuvo una duración de tres (3) semanas y se tomaron muestras cada 3 días con el propósito de cubrir todos los días de la semana. Las muestras de PM₁₀ y PM_{2.5} se recolectaron durante un periodo de muestreo de 24 horas.

Se colectó un total de 168 muestras de PM₁₀ y PM_{2.5} en cada sitio de medición.

1.3. Métodos de medición

1.3.1. *Partículas menores de 10 micrómetros (PM10)*

El método de referencia (American Public Health Association, 1977; World Meteorological Organization, 1978; y Environmental Protection Agency, 1987) permite medir la concentración de partículas menores de 10 micrómetros (PM10) en el aire por medio de un muestreador de alto volumen (Hi-Vol PM10) adecuadamente instalado, que succiona a través de un filtro de cuarzo una cantidad determinada de aire (1.02 a 1.24 m³/min a condiciones reales) en el interior de una caseta de protección, durante un período de muestreo de 24 ± 1 horas. El proceso de medición es no destructivo y la muestra puede someterse a análisis físicos y químicos posteriores.

El muestreador de alto volumen (Hi-Vol PM10) se compone esencialmente de un motor de succión, un portafiltros, un dispositivo de medición de caudal, un controlador de tiempo y una caseta de protección.

1.3.2. *Partículas menores de 2.5 micrómetros (PM2.5)*

El método de referencia (Environmental Protection Agency, 1998) permite medir la concentración de partículas respirables (PM2.5) en el aire, por medio de un muestreador de aire de bajo volumen (Partisol) adecuadamente instalado que tiene un separador de partículas adicional localizado en la entrada que separa partículas finas con un diámetro aerodinámico de 2.5 µm. El muestreador succiona una cantidad determinada de aire (aproximadamente 16.7 L/min a condiciones reales) a través de un filtro de fibra de teflón de 47 mm al interior de una caseta de protección, durante un período de muestreo de 24 ± 1 horas. El proceso de medición es no destructivo y la muestra puede someterse a análisis físicos y químicos posteriores.

El Partisol está equipado con un mecanismo para cambiar automáticamente los filtros al final de un período de muestreo. Los filtros se mantienen dentro ± 5 °C de la temperatura ambiente. También cuenta con sensores de temperatura y presión para medir la temperatura ambiente y la presión atmosférica, las cuales se utilizan para calcular exactamente el caudal de aire.

1.3.3. *Hollín*

La determinación de hollín se realizó mediante gravimetría y calcinación, por medio de una metodología desarrollada por el Laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la Universidad de Antioquia, ante la falta de un procedimiento estandarizado. Aunque dicha metodología es la primera vez que se aplica en nuestro medio, fue desarrollada cuidadosamente y sometida a discusión con algunos expertos.

Un filtro de cuarzo de 20.3 cm × 25.4 cm, del cual una sección de 17.8 cm × 22.9 cm (407.6 cm²) es expuesta en el muestreador de alto volumen, es dividido en secciones. Es necesario el manejo cuidadoso del filtro después del muestreo para evitar errores debido a la pérdida de fibras o partículas del filtro. El primer paso fue definir la porción de filtro que sería sometida al análisis. Para cortar la cantidad de filtro requerida, se empleó una tijera a la que se le realizaba una limpieza adecuada inmediatamente después de cada corte. El filtro a cortar estaba doblado en dos, con las superficies expuestas hacia adentro, con el fin de evitar las pérdidas de material recolectado.

La cantidad de filtro, una vez pesada, es doblada de tal manera que pueda introducirse en una cápsula de porcelana previamente secada y pesada. Luego es llevada a una mufla para ser calcinada a 550°C y pesada después de enfriar. La diferencia de pesos final e inicial de la cápsula permite cuantificar la cantidad de hollín.

2. RESULTADOS

La tabla 4 presenta las concentraciones (a condiciones de referencia) de partículas respirables (PM10 y PM2.5) y hollín en los diferentes puntos de muestreo.

Todas las concentraciones de PM10 encontradas durante el periodo de medición en los diferentes puntos de muestreo cumplen con la norma diaria de calidad del aire ($150 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

La mayoría de las concentraciones de PM2.5 encontradas durante el periodo de medición en los diferentes puntos de muestreo cumplen con la norma diaria de calidad del aire ($65 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Sólo dos (2) sitios de muestreo presentaron un día con concentraciones por encima de la norma diaria de calidad del aire (Andalucía y Belén Los Alpes).

Tabla 4. Concentración de partículas respirables (PM10 y PM2.5) y hollín.

FECHA	PUNTO 1 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			FECHA	PUNTO 2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		
	PM10	PM2.5	Hollín		PM10	PM2.5	Hollín
08/Feb/07	72	37	9.77	23/Mar/07	19	15	1.24
11/Feb/07	61	32	3.68	24/Mar/07	40	31	5.23
14/Feb/07	69	33	8.66	26/Mar/07	52	40	4.71
17/Feb/07	85	47	12.78	29/Mar/07	44	34	6.56
20/Feb/07	74	36	7.13	10/Abr/07	92	53	21.66
23/Feb/07	94	44	18.49	15/Abr/07	40	29	4.10
26/Feb/07	72	35	7.06	18/Abr/07	39	32	5.70
14/May/07	58	27	9.18	26/Jun/07	76	49	6.55
17/May/07	63	34	6.38	29/Jun/07	54	30	8.71
23/May/07	38	16	4.46	02/Jul/07	56	36	2.36
26/May/07	23	19	4.86	05/Jul/07	58	43	9.82
29/May/07	71	46	7.19	08/Jul/07	41	34	5.96
01/Jun/07	88	46	5.50	11/Jul/07	49	40	9.34
03/Jun/07	65	59	4.00	14/Jul/07	31	19	2.60
06/Ago/07	71	25	4.88	18/Sep/07	47	23	1.56
09/Ago/07	54	23	3.64	21/Sep/07	37	27	2.25
12/Ago/07	67	25	5.91	24/Sep/07	45	42	8.57
15/Ago/07	58	10	2.63	27/Sep/07	42	37	6.24
18/Ago/07	58	36	3.06	30/Sep/07	35	31	5.61
21/Ago/07	68	22	10.24	03/Oct/07	38	34	3.08
24/Ago/07	51	28	2.02	06/Oct/07	29	25	3.23
Promedio	65	32	6.74	Promedio	46	34	5.96

Tabla 4. Concentración de partículas PM10 y PM2.5 (continuación).

FECHA	PUNTO 3 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			FECHA	PUNTO 4 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		
	PM10	PM2.5	Hollín		PM10	PM2.5	Hollín
02/Mar/07	80	46	10.12	09/Feb/07	51	36	6.28
05/Mar/07	69	47	6.92	12/Feb/07	46	36	5.31
08/Mar/07	82	41	10.12	15/Feb/07	44	29	6.20
11/Mar/07	46	34	5.16	18/Feb/07	37	29	6.01
14/Mar/07	104	65	12.71	21/Feb/07	47	34	4.98
17/Mar/07	38	33	4.78	24/Feb/07	55	39	8.11
20/Mar/07	65	56	7.15	27/Feb/07	50	35	7.37
05/Jun/07	45	26	3.65	15/May/03	41	30	5.26
08/Jun/07	28	22	3.83	18/May/07	35	34	1.92
11/Jun/07	42	30	3.19	21/May/11	44	37	4.30
14/Jun/07	47	28	2.29	24/May/15	64	63	8.21
17/Jun/07	40	35	5.15	27/May/19	56	47	3.02
20/Jun/07	43	37	3.34	30/May/23	60	44	6.44
23/Jun/07	35	22	2.13	02/Jun/27	45	45	3.14
28/Ago/07	53	41	3.08	07/Ago/07	54	21	5.12
31/Ago/07	75	60	5.25	10/Ago/07	46	21	6.61
03/Sep/07	124	53	16.42	13/Ago/07	46	27	3.79
06/Sep/07	67	49	4.65	16/Ago/07	56	25	4.72
09/Sep/07	59	39	6.36	19/Ago/07	37	24	4.15
12/Sep/07	90	39	9.11	22/Ago/07	62	39	6.97
15/Sep/07	67	45	6.01	25/Ago/07	76	56	4.06
Promedio	62	40	6.26	Promedio	50	36	5.33

Fuente: Elaboración propia. Datos arrojados por el proyecto de investigación

Nota: Concentración a condiciones de referencia (25 °C y 760 mm Hg).

Punto 1: Centro de Medellín

Punto 2: Guayabal

Punto 3: Andalucía

Punto 4: Castilla

Tabla 4. Concentración de partículas PM10 y PM2.5 (continuación).

FECHA	PUNTO 5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			FECHA	PUNTO 6 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		
	PM10	PM2.5	Hollin		PM10	PM2.5	Hollin
22/Mar/07	51	33	5.78	01/Mar/07	86	43	14.59
25/Mar/07	44	34	3.97	04/Mar/07	52	26	2.61
28/Mar/07	43	35	3.46	07/Mar/07	68	34	8.92
09/Abr/07	58	39	5.85	10/Mar/07	33	23	2.40
13/Abr/07	45	33	5.39	13/Mar/07	88	42	11.27
14/Abr/07	50	38	7.01	16/Mar/07	114	56	16.45
17/Abr/07	40	28	4.45	19/Mar/07	70	40	8.45
25/Jun/07	44	33	6.00	04/Jun/07	46	35	3.84
28/Jun/07	47	40	6.58	07/Jun/07	55	37	10.99
01/Jul/07	25	23	0.62	10/Jun/07	25	13	4.02
04/Jul/07	55	36	7.60	13/Jun/07	41	17	6.92
07/Jul/07	40	27	4.07	16/Jun/07	33	17	2.86
10/Jul/07	45	44	3.72	19/Jun/07	49	34	8.11
13/Jul/07	56	35	4.14	22/Jun/07	56	30	1.23
17/Sep/07	27	10	3.09	27/Ago/07	57	22	1.49
20/Sep/07	21	18	2.89	30/Ago/07	77	44	3.46
23/Sep/07	53	31	7.72	02/Sep/07	82	30	8.97
26/Sep/07	32	28	3.58	05/Sep/07	42	24	5.20
29/Sep/07	54	41	6.92	08/Sep/07	55	46	6.64
02/Oct/07	33	25	5.44	11/Sep/07	50	22	4.70
05/Oct/07	29	24	6.08	14/Sep/07	58	38	3.56
Promedio	43	31	4.97	Promedio	59	32	6.51

Tabla 4. Concentración de partículas PM10 y PM2.5 (continuación).

FECHA	PUNTO 7 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			FECHA	PUNTO 8 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		
	PM10	PM2.5	Hollín		PM10	PM2.5	Hollín
24/Abr/07	40	19	5.17	23/Abr/07	48	37	2.16
27/Abr/07	27	17	2.87	26/Abr/07	52	49	3.98
03/May/07	44	12	7.90	29/Abr/07	32	28	3.93
06/May/07	84	10	12.54	02/May/07	81	74	4.20
07/May/07	94	11	13.38	05/May/07	25	14	1.75
09/May/07	20	13	2.24	08/May/07	68	57	5.23
12/May/07	22	20	2.89	11/May/07	32	27	3.49
17/Jul/07	25	18	2.39	16/Jul/07	35	31	5.04
20/Jul/07	20	12	2.48	19/Jul/07	40	29	5.86
23/Jul/07	25	18	4.07	22/Jul/07	33	23	3.17
26/Jul/07	18	17	3.03	25/Jul/07	58	54	6.74
29/Jul/07	16	15	2.04	28/Jul/07	51	41	9.54
01/Ago/07	29	16	3.03	31/Jul/07	53	45	5.42
04/Ago/07	28	15	3.12	03/Ago/07	53	43	4.36
09/Oct/07	18	10	2.21	11/Oct/07	47	40	5.32
12/Oct/07	35	11	3.50	12/Oct/07	39	33	2.63
13/Oct/07	22	19	1.63	13/Oct/07	55	51	6.11
14/Oct/07	29	22	5.16	14/Oct/07	39	33	3.95
15/Oct/07	30	24	3.23	15/Oct/07	54	39	6.39
17/Oct/07	20	12	2.18	16/Oct/07	52	35	8.50
18/Oct/07	13	8	2.01	17/Oct/07	44	22	8.82
Promedio	31	15	4.15	Promedio	47	38	5.08

Fuente: Elaboración propia. Datos arrojados por el proyecto de investigación

Nota: Concentración a condiciones de referencia (25 °C y 760 mm Hg).

Punto 5: El Estadio

Punto 6: Robledo

Punto 7: Santa Elena

Punto 8: Belén Los Alpes

La tabla 5 presenta los resultados de las correlaciones entre las concentraciones de partículas PM2.5 y PM10 registradas en los diferentes sitios de muestreo (ver figura 1). Los análisis de regresión y correlación muestran una correlación lineal significativa en Guayabal y Belén Los Alpes. En los demás puntos, la correlación lineal no es significativa. A excepción de Santa Elena, las correlaciones lineales fueron positivas en todos los sitios de muestreo.

El estadístico R^2 explica el porcentaje de variabilidad de las partículas finas (PM2.5) en función de las partículas respirables (PM10). Las estaciones que explican mejor la variabilidad de las partículas finas en función de las partículas respirables son Guayabal y Belén Los Alpes. La diferencia entre 100 y R^2 es el porcentaje de variabilidad de las partículas finas que no es explicado por las partículas respirables, como por ejemplo la meteorología y la precipitación,

entre otros. Belén Los Alpes fue el único sitio de muestreo que presentó un coeficiente de Pearson mayor de 0.90. Un coeficiente mayor de 0.90 permite afirmar que el responsable del incremento o reducción de las partículas finas y respirables es el mismo tipo de fenómeno, y que sería posible predecir datos de las partículas finas (PM2.5) a partir de datos de las partículas respirables (PM10) en este sitio de muestreo, o viceversa. Por otro lado, Santa Elena fue el único sitio de muestreo que presentó un coeficiente de Pearson negativo.

Se observa una participación importante de las partículas finas en los diferentes sitios de muestreo, representada en promedio por un porcentaje del 67% del total de partículas respirables. Esta situación es preocupante debido que estas partículas representan un mayor riesgo sobre la salud, especialmente en las poblaciones más vulnerables (niños y ancianos).

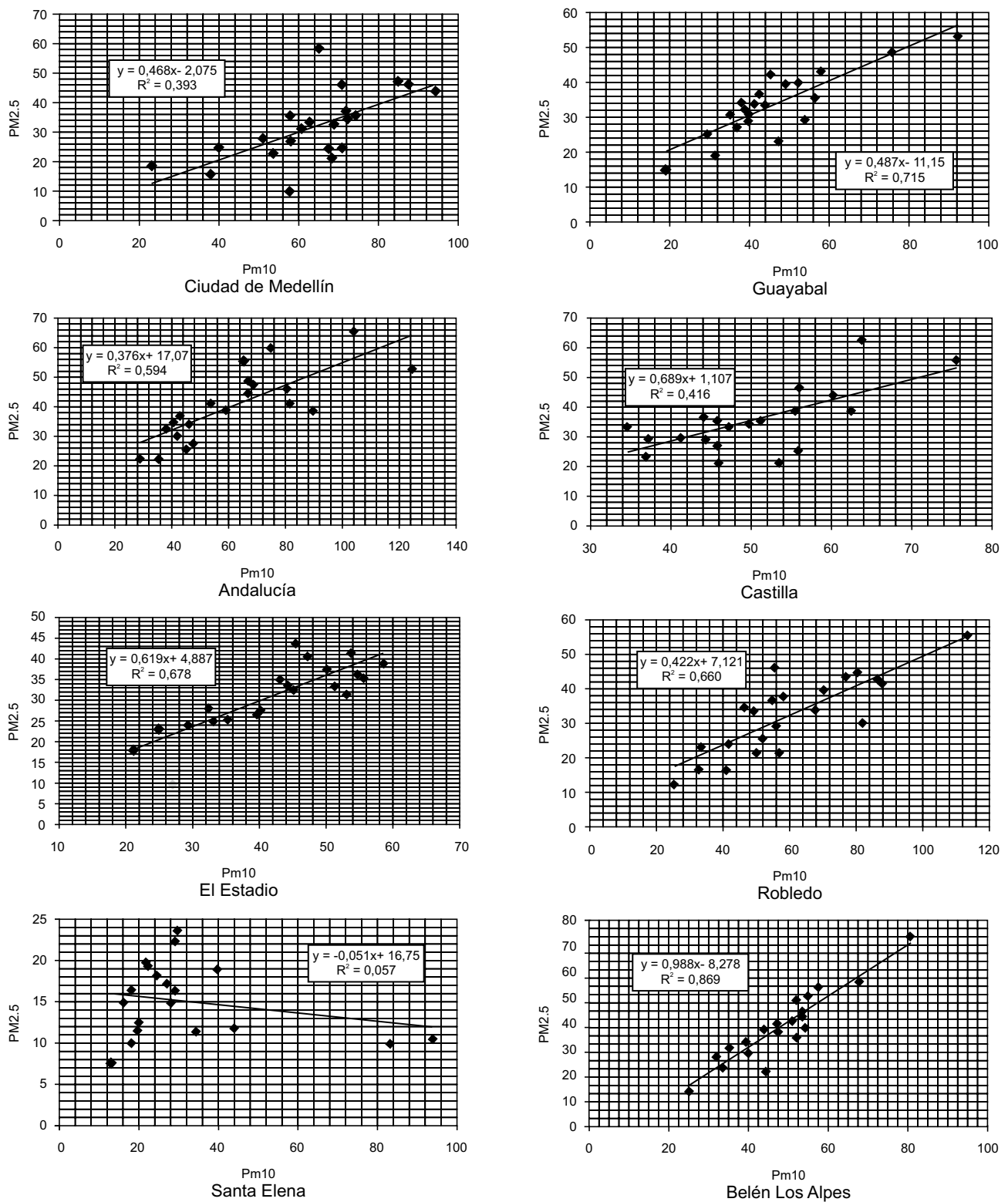
Tabla 5. Resumen de los resultados de correlación entre PM2.5 y PM10 en los diferentes sitios de muestreo.

SITIO DE MUESTREO	R^2 (REGRESIÓN LINEAL)	RELACIÓN PM2.5/PM10	COEFICIENTE DE PEARSON
Centro de Medellín	0.393	0.508	0.627
Guayabal	0.715	0.751	0.846
Andalucía	0.594	0.685	0.771
Castilla	0.416	0.715	0.645
El Estadio	0.678	0.741	0.824
Robledo	0.660	0.555	0.813
Santa Elena	0.057	0.601	-0.241
Belén Los Alpes	0.869	0.801	0.933

Fuente: Elaboración propia. Datos arrojados por el proyecto de investigación

Belén Los Alpes es el sitio de muestreo que tiene la mayor relación (PM2.5/PM10), es decir, que las partículas finas son las más abundantes

dentro de las partículas respirables (80.1%). Esta relación tan alta se debe a que el parque automotor influye fuertemente en dicho sitio.



Fuente: Elaboración propia. Datos arrojados por el proyecto de investigación

Figura 1. Correlación entre PM2.5 y PM10.

Santa Elena, además de tener una correlación negativa, es el que tiene el menor coeficiente de correlación; lo que sugiere que las partículas, especialmente las finas (PM2.5), provienen del transporte de este contaminante de otras zonas de la ciudad o de otras regiones, más que a la influencia directa de las vías cercanas. El sitio de muestreo ubicado en el corregimiento de Santa Elena está localizado en una zona que no tiene influencia directa de grandes industrias, aunque está cerca a la vía que conduce al municipio de Rionegro, que presenta un flujo vehicular mediano. La relación PM2.5/PM10 de 0.601 en este sitio de muestreo confirma esta hipótesis, pues se esperaría una relación superior a 0.60 bajo la influencia directa de fuentes de combustión (Rojas y Galvis, 2005), o inferior a 0.30 bajo la influencia directa de partículas de origen natural, partículas resuspendidas o erosión.

El coeficiente de Pearson obtenido para Belén Los Alpes fue de 0.933. Un coeficiente de Pearson mayor a 0.90 permite afirmar que el mismo tipo de fenómeno es el responsable del incremento o

reducción de las partículas PM2.5 y PM10, y que sería posible predecir datos de PM2.5 a partir de datos de PM10 en este sitio.

El bajo coeficiente de correlación de Pearson para los otros sitios de muestreo, especialmente Santa Elena, el Centro de Medellín y Castilla, indica que la interacción entre los efectos de las fuentes y los parámetros es compleja y no permite una predicción de datos de PM2.5 a partir de la medición de datos de PM10.

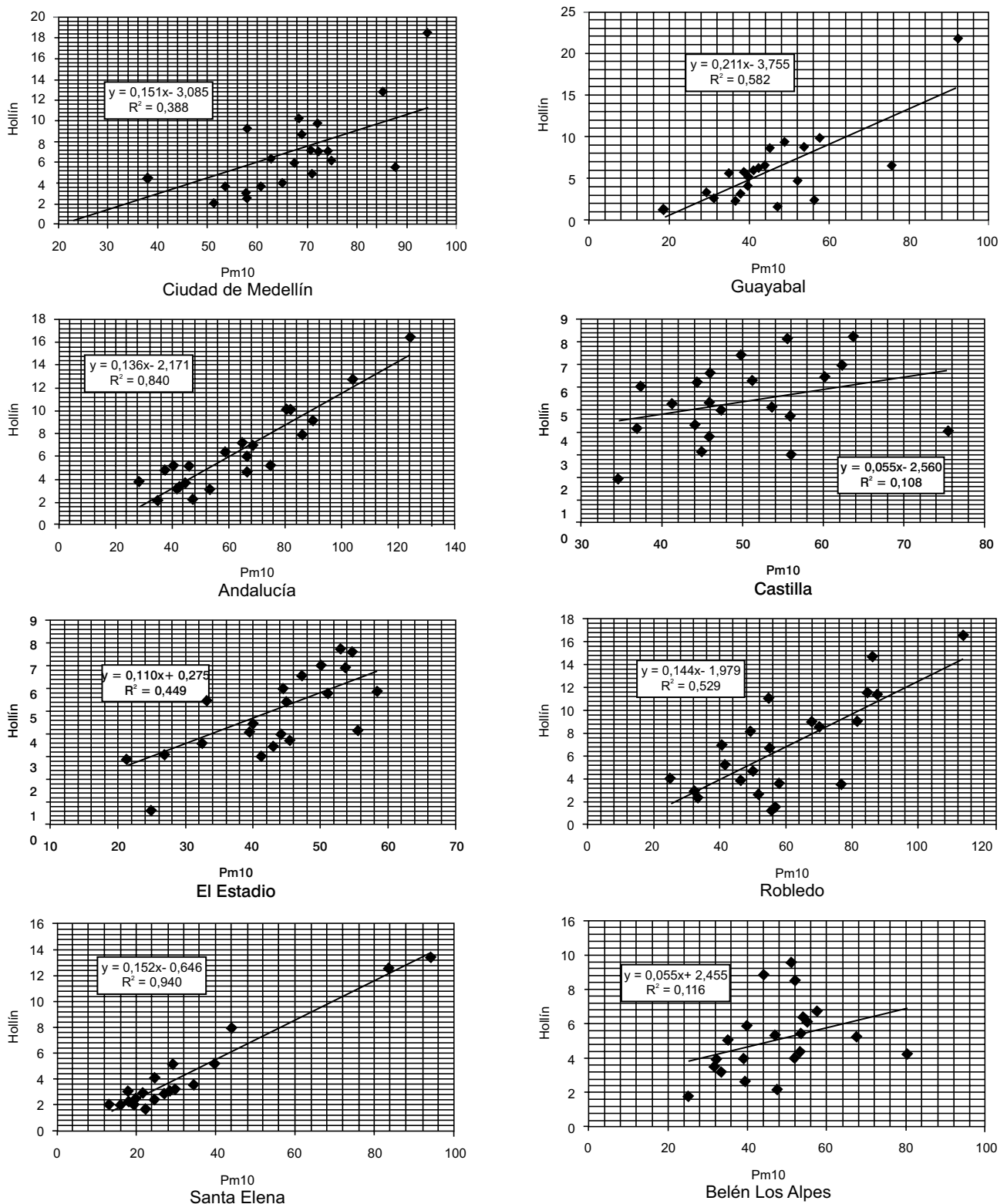
La relación PM2.5/PM10 estimada por Larsen para el Área Metropolitana del Valle de Aburrá se ajusta bastante bien a los resultados obtenidos en este estudio (Larsen, 2004).

La tabla 6 presenta los resultados de las correlaciones entre las concentraciones de partículas hollín y PM10, registradas en los diferentes sitios de muestreo (ver figura 2). Los análisis de regresión y correlación muestran una correlación lineal significativa en Santa Elena y Andalucía. En los demás puntos, la correlación lineal no es significativa. En todos los sitios de muestreo las correlaciones lineales fueron positivas.

Tabla 6. Resumen de los resultados de correlación entre hollín y PM10 en los diferentes sitios de muestreo.

SITIO DE MUESTREO	R ² (REGRESIÓN LINEAL)	RELACIÓN HOLLÍN/PM10	COEFICIENTE DE PEARSON
Centro de Medellín	0.388	0.104	0.624
Guayabal	0.582	0.123	0.763
Andalucía	0.840	0.098	0.917
Castilla	0.108	0.108	0.329
El Estadio	0.449	0.117	0.670
Robledo	0.529	0.109	0.727
Santa Elena	0.940	0.128	0.970
Belén Los Alpes	0.116	0.110	0.342

Fuente: Elaboración propia. Datos arrojados por el proyecto de investigación



Fuente: Elaboración propia. Datos arrojados por el proyecto de investigación

Figura 2. Correlación entre hollín y PM10.

Santa Elena y Andalucía fueron los únicos sitios de muestreo que presentaron un coeficiente de Pearson mayor de 0.90. Un coeficiente mayor de 0.90 permite afirmar que el responsable del incremento o reducción de hollín y PM10 es el mismo tipo de fenómeno, y que sería posible predecir datos de hollín a partir de datos de PM10 en este sitio de muestreo, o viceversa.

Las relaciones (hollín/PM10) en términos generales fueron bajas. Santa Elena es el sitio de muestreo que tiene la mayor relación (hollín/PM10), aunque es baja en comparación con las relaciones encontradas en otros estudios (Echeverri, 2004). El origen de este hollín, en gran parte, puede atribuirse a las quemaduras de material vegetal que se presentan en la región.

La tabla 7 presenta los resultados de las correlaciones entre las concentraciones de partículas hollín y PM2.5, registradas en los diferentes sitios de muestreo (ver figura 3). La variabilidad de los

datos de hollín y PM2.5, tomados por separado, está relacionada con la actividad de las fuentes antropogénicas, tanto fijas como móviles, así como la variabilidad meteorológica. Los análisis de regresión y correlación no muestran una correlación lineal significativa en los diferentes sitios de muestreo. A excepción de Santa Elena, las correlaciones lineales fueron positivas en todos los sitios de muestreo.

Todos los sitios de muestreo presentaron un coeficiente de Pearson menor de 0.90. Santa Elena fue el único sitio de muestreo que presentó un coeficiente de Pearson negativo. Los bajos valores en los coeficientes de correlación de Pearson indican que la interacción entre los efectos de las fuentes y los parámetros (hollín y PM2.5) es compleja y no permite una predicción de datos de hollín a partir de la medición de partículas PM2.5. En términos generales, todas las relaciones (hollín/PM2.5) en los diferentes sitios de muestreo fueron bajas.

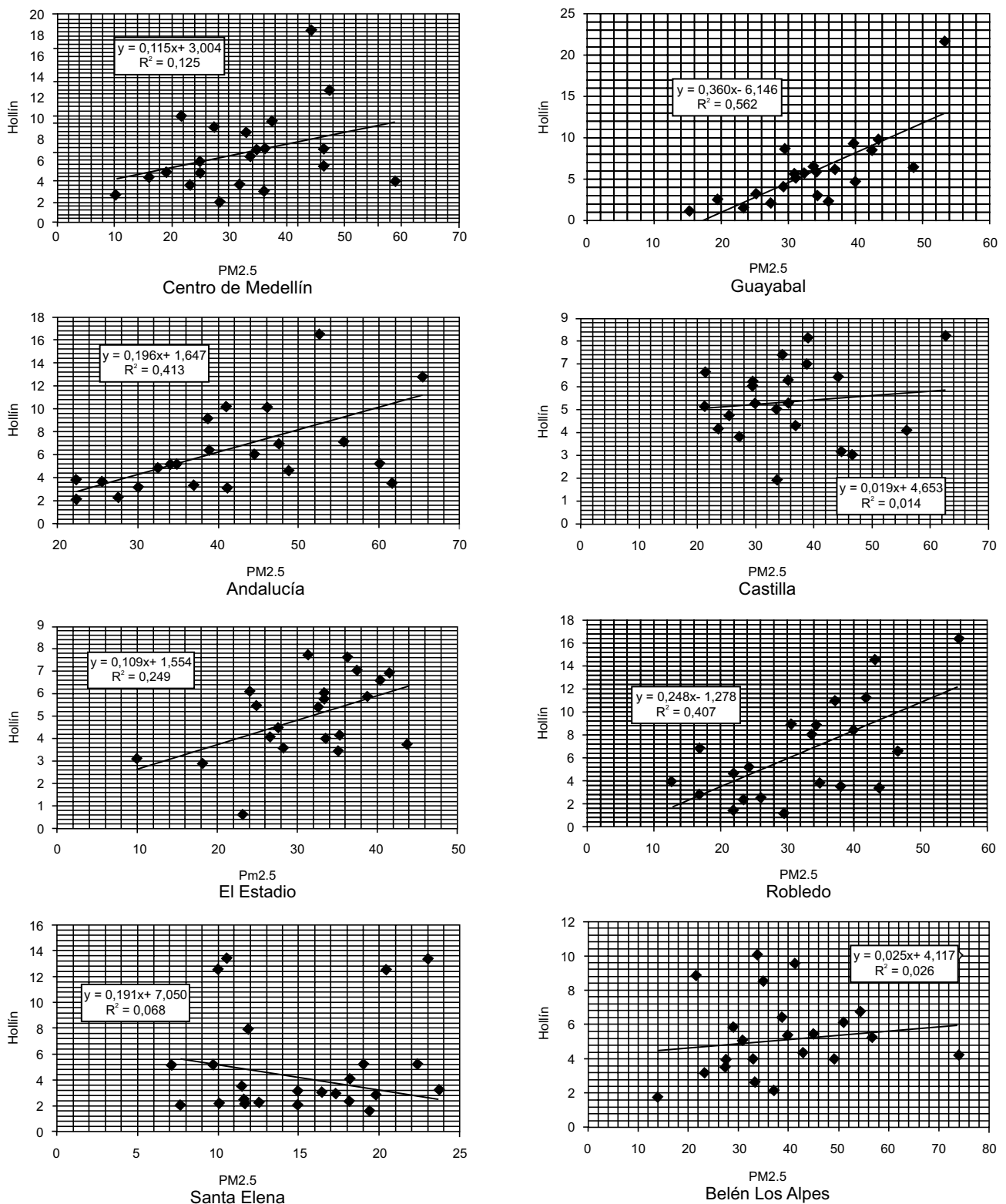
Tabla 7. Resumen de los resultados de correlación entre hollín y PM2.5 en los diferentes sitios de muestreo.

SITIO DE MUESTREO	R ² (REGRESIÓN LINEAL)	RELACIÓN HOLLÍN/PM2.5	COEFICIENTE DE PEARSON
Centro de Medellín	0.125	0.219	0.354
Guayabal	0.562	0.166	0.750
Andalucía	0.413	0.151	0.643
Castilla	0.014	0.161	0.121
El Estadio	0.249	0.165	0.499
Robledo	0.407	0.203	0.638
Santa Elena	0.068	0.317	-0.261
Belén Los Alpes	0.026	0.144	0.163

Fuente: Elaboración propia. Datos arrojados por el proyecto de investigación

La tabla 8 presenta la agrupación de los sitios de muestreo según la concentración de PM10 y PM2.5; la clasificación se hizo en cuatro categorías con base en los niveles máximos permisibles

establecidos en la resolución 601 de 2006 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial para cada contaminante.



Fuente: Elaboración propia. Datos arrojados por el proyecto de investigación

Figura 3. Correlación entre hollín y PM2.5.

Tabla 8. Clasificación de los sitios de muestreo.

% norma	PM10	PM2.5
< 50	7	
51 - 75	2, 4, 5, 8	
76-100	1, 3, 6	
> 100		1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8

Nota: Para PM10 y PM2.5, la norma es la anual (70 y 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente).

Fuente: Elaboración propia. Datos arrojados por el proyecto de investigación

Según las partículas respirables (PM10), no hay puntos de muestreo ubicados en la zona de contaminación alta (concentraciones de partículas PM10 superiores a la norma anual de calidad del aire para PM10). Sin embargo, según las partículas menores de 2.5 μm (PM2.5), todos los puntos de muestreo se encuentran en la zona de contaminación alta (concentraciones de partículas menores de 2.5 μm superiores a la norma anual de calidad del aire para PM2.5).

La prueba de Kruskal-Wallis indica que hay una diferencia estadísticamente significativa entre las concentraciones medias de PM10 ($p = 0.00000000426$) en los diferentes sitios de muestreo con un nivel de confianza del 95%. La misma prueba arrojó, con el mismo nivel de confianza, que no hay una diferencia estadísticamente significativa entre las concentraciones medias de PM2.5 ($p = 0.189186$) en los diferentes sitios de muestreo.

3. CONCLUSIONES

- Aunque la mayoría de las concentraciones de PM2.5 encontradas durante el período de medición en los diferentes puntos de muestreo cumplen con la norma diaria de calidad del aire ($65 \mu\text{g}/\text{m}^3$), las partículas finas (PM2.5)

se presentan como el principal problema de contaminación en la ciudad de Medellín.

- En todos los sitios de muestreo, las partículas PM2.5 tienen la tendencia a superar la norma anual de calidad del aire ($15 \mu\text{g}/\text{m}^3$) si las concentraciones presentan el mismo comportamiento que el registrado en el período de muestreo para un período de 12 meses. Esta situación es preocupante debido a que las partículas finas representan un mayor riesgo sobre la salud, especialmente en las poblaciones más vulnerables (niños y ancianos).
- Según la clasificación propuesta de acuerdo con el nivel de contaminación por partículas respirables (PM10), no hay sitios de muestreo ubicados en la zona de contaminación alta (concentraciones de partículas PM10 superiores a la norma anual de calidad del aire para PM10). Santa Elena queda ubicada en zona de contaminación baja; Guayabal, Castilla, El Estadio y Belén Los Alpes quedan ubicados en zona de contaminación media baja; y el Centro de Medellín, Andalucía y Robledo quedan ubicados en zona de contaminación media alta.
- A pesar de que en todos los sitios de muestreo las partículas PM10 tienen la tendencia a permanecer por debajo de la norma anual de calidad del aire ($70 \mu\text{g}/\text{m}^3$), se puede concluir que la situación es preocupante, ya que si comparamos los resultados con la norma que regirá en el año 2011 para Colombia, un alto porcentaje (50%) de los puntos evaluados no cumpliría dicha norma ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$).
- De acuerdo con los niveles de partículas menores de 2.5 μm (PM2.5), todos los puntos de muestreo se encuentran en la zona de alta contaminación (concentraciones de partículas menores de 2.5 μm superiores a la norma anual de calidad del aire para PM2.5).

- Un parámetro que ayuda a visualizar el problema de las partículas finas (PM2.5) en Medellín es la relación (PM2.5/PM10). Todos los sitios de muestreo tienen una relación (PM2.5/PM10) muy alta, que hace pensar que probablemente se puede cumplir con la norma anual para PM10 pero no para PM2.5.

La relación (PM2.5/PM10) promedio para los sitios o zonas bajo consideración en este estudio fue de aproximadamente 0.67. Si las mediciones de PM10 están por debajo de la norma anual ($70 \mu\text{g}/\text{m}^3$) en un 36% ($44.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$), las partículas respirables estarían sobrepasando su norma anual ($15 \mu\text{g}/\text{m}^3$) en un 100%, es decir, $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

- La linealidad de la relación PM2.5/PM10 en la estación Belén Los Alpes permite utilizar datos de PM10 para predecir con confianza la concentración de PM2.5.

Los datos de PM2.5 no se pueden estimar a partir de datos de PM10 en las demás estaciones. Sería necesario monitorear PM2.5 de manera permanente y estudiar con detalle las interacciones entre las fuentes y las variables meteorológicas alrededor de estas estaciones.

4. RECOMENDACIONES

- Incorporar las mediciones de partículas PM2.5 a la gestión ambiental e incluirla en estudios epidemiológicos, dado que es la fracción más

tóxica de las partículas totales, porque provienen de los procesos de combustión y, además, por el tamaño de las partículas, que son capaces de penetrar hasta los alvéolos pulmonares y, por ende, tienen mayor incidencia en la salud.

- A corto plazo la red de vigilancia de la calidad del aire (REDAIRE) debe adecuarse para realizar el seguimiento de partículas finas (PM2.5) en Medellín. Inicialmente se propone el cubrimiento con mínimo 5 muestreadores PM2.5. Estos equipos deben ubicarse conjuntamente con muestreadores PM10, para de esta manera optimizar su operación y aportar a un mejor conocimiento de la relación PM2.5/PM10 en la ciudad de Medellín.
- Generar políticas que permitan el control de las fuentes que generan principalmente PM2.5, PM10 y hollín. Estos generalmente son producto de la combustión incompleta y la utilización de diesel de mala calidad en el transporte público; por tanto, tales políticas deben ir dirigidas hacia la revisión técnico mecánica que asegure la calidad de los automotores que circulan en la ciudad, así como a la exigencia a los empresas responsables de la producción de diesel, que éste cumpla las condiciones de calidad necesarias para evitar altos niveles de contaminación.

REFERENCIAS

- ABBEY, D. ET AL. "Chronic respiratory symptoms associated with long-term ambient concentrations of fine particulates less than 2.5 microns in aerodynamic diameter (PM_{2.5}) and other air pollutants". J-Expo-Anal-Environ-Epidemiol. Vol.5. No2. Apr-Jun, 1995. p.137-159.
- APHA INTERSOCIETY COMMITTEE. 1977. Methods of air sampling and analysis. Washington, D.C.: American Public Health Association.
- ECHEVERRI, CARLOS ET AL. Partículas suspendidas (PST) y partículas respirables (PM₁₀) en el Valle de Aburrá, Colombia. Revista Facultad de Ingeniería. Universidad de Antioquia, No 32. ISSN 0120-6230. Medellín, diciembre de 2004.
- FEDERAL REGISTER, 1987. Volume 52, N° 52, 40 CFR Parts 50, 51, 52, 53 and 58. Ambient Air Quality Standards for Particulate Matter. Environmental Protection Agency. North Carolina.
- LARSEN, B., 2004. Cost of environmental damage: A socio-economic and environmental health risk assessment. Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. Bogotá.
- LARSEN, B. "Hygiene and Health in Developing Countries: Defining Priorities through Cost-Benefit Assessments." International Journal of Environmental Health Research, N° 13. 2003. p. 37- 46.
- NAVARRO, R., 1981. Química Ambiental: Contaminación del aire y del agua. Editorial Blume, Barcelona. ISBN: 84-7031-259-6. pág. 67-136.
- NIETO, O., 1993. Efectos en la salud de la contaminación por material particulado. En: Curso Contaminación del Aire por Material Particulado. AINSA. Medellín.
- ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD., 2007. Las directrices sobre la calidad del aire en la protección de la salud pública. Octubre de 2006. En: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es/index.html>. (fecha de consulta: 2/11/2007).
- QUALITY ASSURANCE GUIDANCE DOCUMENT 2.12., 1998. Environmental Protection Agency. Human Exposure and Atmospheric Sciences Division. Research Triangle Park NC 27711.
- RED DE VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE. BOLETÍN 17., 2005. Medellín. Junio de 2005.
- ROJAS, NÉSTOR y GALVIS, BORIS., 2005. Relación entre PM_{2.5} y PM₁₀. En: Revista de Ingeniería, Universidad de Los Andes. N° 22, pp 54-60. Bogotá. Noviembre de 2005.
- SECRETARÍA DEL MEDIO AMBIENTE. MEDELLÍN., 2006. Consultoría para la evaluación de la calidad del aire, intensidad de ruido y sus efectos en la salud en 25 sitios de alto tráfico vehicular de la ciudad de Medellín. Universidad de Medellín y Universidad de Antioquia.
- WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. International operations handbook for measurement of background atmospheric pollution. Geneva, 1978. No. 491.